

**VITOR TAHA SANT'ANA**

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS  
BIFÁSICOS DEVIDO A UTILIZAÇÃO DE  
MICROBOLHAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2017**

**VITOR TAHA SANT'ANA**

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS  
DEVIDO A UTILIZAÇÃO DE MICROBOLHAS**

**Trabalho de Conclusão de Curso** apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos fluidos e transferência de massa.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José de Souza

**UBERLÂNDIA - MG  
2017**

## **Agradecimentos**

Eu gostaria de primeiro agradecer o suporte e carinho fornecido pelos meus pais, Mário Lúcio e Leila, e também ao meu irmão mais velho, Felipe, por sempre me auxiliar e me orientar com algumas experiências que eles já viveram.

Gostaria de agradecer também a instituição, UFU, a faculdade de engenharia mecânica, FEMEC, e principalmente o laboratório, MFLab, pelo auxílio, tanto de espaço físico quanto de equipamentos necessários para a realização da pesquisa.

Agradeço ainda os meus amigos ingressantes na minha turma, que durante toda a graduação sempre ajudamos uns aos outros, até o último dia de aula.

E por último, e o mais importante agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco José de Souza, pela sua orientação, paciência, conhecimento e disponibilidade, fatores os quais foram essenciais para o término do meu trabalho, sem a sua confiança nada disso teria se realizado. Afirmo ainda que foi o professor que mais me chamou atenção para a pesquisa, devido ao grande conhecimento na área de fluidos e a brilhante maneira, na minha opinião, de enxergar os problemas de engenharia e do mundo.

SANT'ANA, V. T. **Redução de Arrasto em Escoamentos Bifásicos devido a utilização de Microbolhas**. 2017. 26 p. Monografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é simular computacionalmente, através do uso da teoria da fase discreta, métodos de redução de arrasto utilizando microbolhas com base em experimentos já realizados. Sabe-se que as microbolhas são capazes de reduzir a viscosidade geral do fluido principal, o que indiretamente reduz a tensão de cisalhamento, pois ambos são diretamente proporcionais. O principal mecanismo de redução do arrasto está interligado com o fato das microbolhas amortecerem os vórtices turbulentos da camada limite, reduzindo a tensão de cisalhamento naquela região. Logo, a redução de arrasto é mais evidente se as partículas permanecerem próximas à camada limite do escoamento. Para validar essa teoria, este trabalho utilizou o método de volumes finitos, no qual o software *ICEM*® gerou a malha do canal de água e para a simulação do escoamento utilizou-se o *FLUENT*® com a teoria de fase discreta disponível. Os resultados obtidos foram satisfatórios e condiziam com os resultados experimentais apresentados na bibliografia.

**Palavras chave:** microbolhas, tensão de cisalhamento, camada limite, canal de água, fase discreta.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Imagem da supercavitação ocorrendo no experimento realizado pela Universidade de Minnesota no St. Anthony Fall Lab. FONTE: Imagem retirada do vídeo disponível no YouTube. ....	11
Figura 1.2 - Aparato experimental montado por Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996). ....	12
Figura 2.1 - Esquematização da reflexão das partículas.....	16
Figura 2.2 - Princípio de atuação da Força de Sustentação de Saffman.....	17
Figura 3.1 - Malha do canal de água e microbolhas.....	20
Figura 3.2 - Representação da malha referente ao canal simulado. ....	22
Figura 4.1 - Gradiente de pressão sem e com microbolhas. ....	24
Figura 4.2 - Campo de pressão no inlet à esquerda e concentração de hidrogênio no inlet à direita. ....	24
Figura 4.3 - Campo de pressão do escoamento sem microbolhas. ....	25
Figura 4.4 - Campo de pressão do escoamento com microbolhas de diâmetro igual a 100 $\mu\text{m}$ . ....	26
Figura 4.5 - Gráfico da redução do arrasto em função da concentração de ar injetado no escoamento (KATO; GUIN; YAMAGUCHI; MAEDA; MIYANAGA, 1996). ....	27
Figura 4.6 - Concentração de microbolhas (fase discreta) na região de saída do canal. ....	27
Figura 4.7 - Tensão de cisalhamento na parede superior do canal. Com microbolhas à direita e sem microbolhas à esquerda. ....	28
Figura 4.8 - Perfil de velocidade do escoamento sem microbolhas à esquerda e com microbolhas à direita. ....	28
Figura 4.9 - Perfil de velocidade na parede do canal com e sem microbolhas de 100 $\mu\text{m}$ de diâmetro. ....	29

## **Lista de Tabelas**

Tabela 4.1 - Redução da velocidade com a injeção de microbolhas.....	29
--	----

## Lista de Símbolos

$a_m$	Concentração de hidrogênio	-
$\rho$	Massa específica da fase contínua	$[kg/m^3]$
$\rho_p$	Massa específica da partícula	$[kg/m^3]$
$\mu$	Viscosidade dinâmica	$[Pa \cdot s]$
$\tau$	Tensão de cisalhamento	$[Pa]$
$\tau_p$	Tempo de relaxação da partícula	$[s]$
$a$	Aceleração devido às forças	$[m/s^2]$
$A_{bolha}$	Área da microbolha	$[m^2]$
$b$	Largura do canal ( <i>Kato et al.</i> )	$[m]$
$B$	Largura do canal	$[m]$
$C_D$	Coefficiente de arrasto	-
CFD	Computational Fluid Dynamics	-
$d_{ij}$	Tensor de deformação	-
$d_p$	Diâmetro da partícula	$[m]$
$e_n$	Coefficiente de restituição na direção normal	-
$e_t$	Coefficiente de restituição na direção tangencial	-
$F_D$	Força de arrasto	$[N]$
$\vec{F}_{externa}$	Vetor força externa	$[N]$
$F_{gp}$	Força devido ao gradiente de pressão	$[N]$

$F_{vm}$	Força de massa virtual	[N]
$F_x$	Força adicional de aceleração da partícula	[N]
$g_x$	Aceleração gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Altura do canal ( <i>Kato et al.</i> )	[m]
$H$	Altura do canal	[m]
$K$	Constante definida	-
$L$	Comprimento do canal	[m]
$m$	Massa	[kg]
$p$	Pressão	[Pa]
$P_{entra}$	Pressão que o escoamento entra	[Pa]
$P_{sai}$	Pressão que o escoamento sai	[Pa]
$Q_a$	Razão volumétrica de injeção de hidrogênio	[m <sup>3</sup> /s]
$Re$	Número de Reynolds	-
$u$	Velocidade da fase continua em “x”	[m/s]
$u_p$	Velocidade da partícula em “x”	[m/s]
$U_{m0}$	Velocidade máxima da água	[m/s]
$v_p$	Velocidade da partícula tridimensional	[m/s]
$\vec{V}$	Vetor velocidade no campo de escoamento	[m/s]
$V_{1,t}$	Velocidade tangencial antes da colisão	[m/s]
$V_{2,t}$	Velocidade tangencial depois da colisão	[m/s]



$V_{1,n}$	Velocidade normal antes da colisão	$[m/s]$
$V_{2,n}$	Velocidade normal depois da colisão	$[m/s]$
$x_p$	Posição da partícula	$[m]$

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Revisão Bibliográfica.....	14
2.1. Modelos matemáticos .....	14
2.2. Aproximação Euleriana-Lagrangiana das partículas .....	14
2.3. Equação do movimento das partículas.....	15
2.3.1. Integrando a equação do movimento .....	15
2.4. Coeficiente de restituição das partículas.....	16
2.5. Forças utilizadas na fase discreta.....	17
2.5.1. Força de sustentação de Saffman .....	17
2.5.2. Força de massa virtual.....	17
2.5.3. Força devido ao Gradiente de pressão.....	18
2.6. Cálculo da tensão de cisalhamento .....	18
2.7. Fração volumétrica de hidrogênio .....	19
3. Metodologia e Desenvolvimento .....	20
3.1. Microbolhas injetadas na entrada do domínio .....	20
3.2. Microbolhas injetadas na região de camada limite.....	21
4. Resultados e Discussões.....	24
4.1. Microbolhas injetadas na entrada do domínio .....	24
4.2. Microbolhas injetadas na região de camada limite.....	25
5. Conclusão .....	30
Bibliografia.....	31
Apêndice.....	33

## 1. Introdução

O estudo sobre a redução de arrasto em escoamentos bifásicos, nos quais o fluido principal é água existe há décadas, e o principal fator que motivou a utilização de microbolhas em escoamentos com água foi a supercavitação, utilizada em submarinos russos e norte-americanos, o qual uma bolha de polímero aquecido é utilizada para envolver o mesmo, fazendo com que o submarino adquira uma forma de gota reduzindo o arrasto dos submarinos e consequentemente aumentando a velocidade máxima que eles podiam alcançar. Em 1960, a URSS desenvolveu um torpedo de alta velocidade que viajava submarinamente com a tecnologia de supercavitação, o resultado foi um projétil quatro ou cinco vezes mais rápido que os tradicionais. A Fig. 1.1 mostra o princípio da supercavitação.

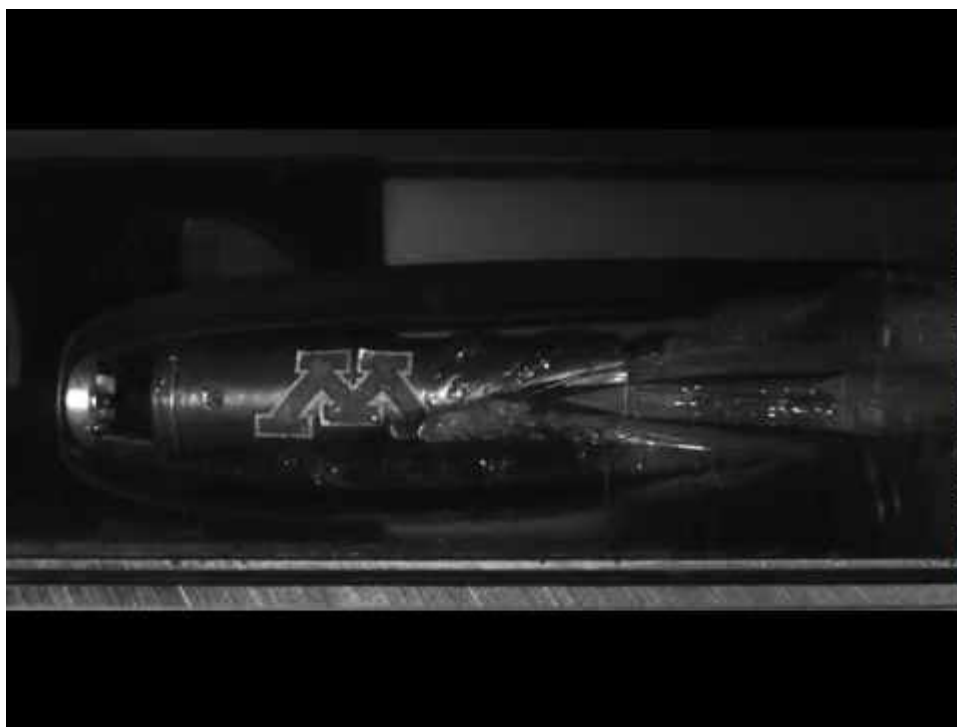


Figura 1.1 - Imagem da supercavitação ocorrendo no experimento realizado pela Universidade de Minnesota no St. Anthony Fall Lab. FONTE: Imagem retirada do vídeo disponível no YouTube.

Mais tarde, foi descoberto que uma camada de ar próxima a uma superfície de água reduz a fricção da camada turbulenta, este conceito é recentemente conhecido e foi descoberto em 1973 pelo trabalho de McCormick e Bhattacharyya, os quais moveram um corpo simétrico axialmente com 915 mm de comprimento e 127 mm de diâmetro em um tanque de água com velocidades variando entre 0,3 até 2,6 m/s. Um fio de cobre enrolado no corpo foi a fonte das bolhas de hidrogênio através da eletrólise.

Schlichting e Gersten (2000) descobriram que a adição de polímeros no escoamento modifica a estrutura turbulenta do escoamento amortecendo os vórtices. Quase ao mesmo tempo, Kodama (1998), descobriu que o mecanismo de redução de arrasto com a utilização de microbolhas depende do tamanho e da distribuição das mesmas.

Estudos feitos por Merkle e Pal (1988) mostram, através da medição com feixe de laser, que não há redução da tensão de cisalhamento do fluido com a parede se as microbolhas permanecerem a uma distância da parede maior que  $y^+$  definido individualmente de acordo com o experimento. Madavan (1985) afirma, através de um estudo computacional, que com base na viscosidade aumentada causada por suspensões particuladas, verificou-se que as bolhas precisam estar na camada limite para reduzir o arrasto.

Recentemente, Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996). realizaram diversos experimentos com microbolhas na camada limite em canais de chapa plana, aprimorando o método convencional de injeção de microbolhas, antes utilizando chapas porosas e agora utilizando um gerador de microbolhas externo para injetar as mesmas diretamente na camada turbulenta em um dos lados da parede da seção de teste, medindo a tensão de cisalhamento por um transdutor de flutuações de elemento. A ideia deste estudo é simular essa nova tecnologia em redução de arrasto computacionalmente e compará-la com a injeção simultânea de água e microbolha de hidrogênio. A Fig 1.2 mostra o aparato experimental montado no experimento realizado por Kato (1996).

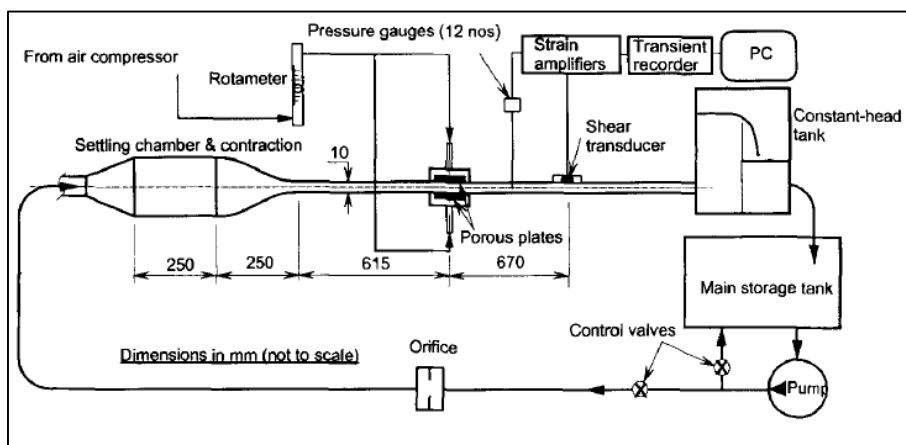


Figura 1.2 - Aparato experimental montado por Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996).

A ideia do presente trabalho é simular essa nova tecnologia em redução de arrasto computacionalmente e compará-la com a injeção simultânea de água e microbolha de hidrogênio.

As microbolhas modificam a camada limite turbulenta do escoamento e reduzem a tensão de cisalhamento da parede, sendo assim, há uma economia de energia no escoamento. Alguns resultados expressivos já foram obtidos na área, chegando em até 80% em algumas condições. A principal aplicação deste estudo está concentrado na área marítima, como a redução de arrasto de forma do casco de navios e outras áreas relacionadas.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Modelos matemáticos

O escoamento no canal de água é modelado com base nas leis de mecânica dos fluidos, como a equação da continuidade (Eq. 2.1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

A conservação de quantidade de movimento para a fase dispersa (microbolhas) é calculada através do somatório das forças externas definidos pela Eq. 2.2:

$$\sum \vec{F}_{externa} = \frac{m(d\vec{V})}{dt} \Big| = \frac{d(m\vec{V})}{dt} \Big| \quad (2.2)$$

E as equações de Navier-Stokes para o líquido incompressível, que é tratado como um meio contínuo (Eq. 2.3):

$$\frac{\rho D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} - \vec{\nabla} p + S_\phi \quad (2.3)$$

### 2.2. Aproximação Euleriana-Lagrangiana das partículas

A fase discreta se encarrega em resolver as equações da fase continua e permite o usuário a simular a segunda fase discreta com um referencial lagrangiano. A segunda fase consiste em partículas esféricas (microbolhas) dispersas na fase contínua, e o *Fluent*® computa a trajetória dessas partículas, assim como a transferência de massa e momento entre elas.

A fase fluida é tratada como um meio contínuo, e seu escoamento é resolvido através das equações de Navier-Stokes no intervalo de tempo, enquanto a fase dispersa é resolvida rastreando um grande número de partículas, microbolhas nesse caso, através do campo de escoamento calculado.

Uma suposição fundamental para esse modelo é que a segunda fase, a fase dispersa, ocupa uma fração muito baixa de volume, mesmo com uma alta quantidade de massa carregada pelo fluido. As trajetórias das partículas são computadas individualmente em

intervalos específicos de tempo durante o cálculo da fase fluida. Isso torna o modelo apropriado para modelar o problema em questão.

### 2.3. Equação do movimento das partículas

O *Fluent*® calcula a trajetória das partículas através da integração do balanço de forças atuantes nelas. Esse balanço de forças equaciona a inércia da partícula com as forças que atuam nelas mesmas, e pode ser escrita da seguinte forma (para a direção x do plano Cartesiano):

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_x \quad (2.4)$$

onde  $F_x$  é um termo adicional de aceleração (força por unidade de massa da partícula),  $F_D(u - u_p)$  é a força de arrasto por unidade de massa da partícula e ainda,

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2.5)$$

sendo  $u$  a velocidade da fase fluida,  $u_p$  a velocidade da partícula,  $\mu$  a viscosidade molecular do fluido,  $\rho$  a densidade do fluido,  $\rho_p$  a densidade da partícula,  $C_D$  o coeficiente de arrasto e  $d_p$  o diâmetro da partícula.  $Re$  é o número de Reynolds relativo:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (2.6)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re} \quad (2.7)$$

Onde  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  são constantes dependentes do número de  $Re$  dadas por Morsi e Alexander.

#### 2.3.1. Integrando a equação do movimento

A equação da trajetória é resolvida através da discretização temporal da equação do movimento para cada passo de tempo. A trajetória da partícula é prevista por:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (2.7)$$

Na forma geral:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(u - u_p) + a \quad (2.8)$$

No qual o termo  $a$  inclui a aceleração de todas as outras forças, com exceção da força de arrasto.

Considerando  $u$ ,  $a$  e  $\tau_p$  constantes, pode-se integrar analiticamente, logo a velocidade da partícula no novo passo de tempo fica:

$$u_p^{n+1} = u^n + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}}(u_p^n - u^n) - a\tau_p(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} - 1) \quad (2.9)$$

E a nova posição da partícula  $x_p^{n+1}$  pode ser computado analogamente:

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta t(u^n + a\tau_p) + \tau_p(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}})(u_p^n - u^n - a\tau_p) \quad (2.10)$$

## 2.4. Coeficiente de restituição das partículas

Na fase discreta, as partículas podem adquirir diversos comportamentos quando encontram uma parede, no caso em questão, ela é refletida com um coeficiente de restituição  $e_n$  e  $e_t$  definido pelo software, podendo calcular a velocidade após o choque com as equações (2.10) e (2.11). A Fig. 2.1 mostra a reflexão da partícula.

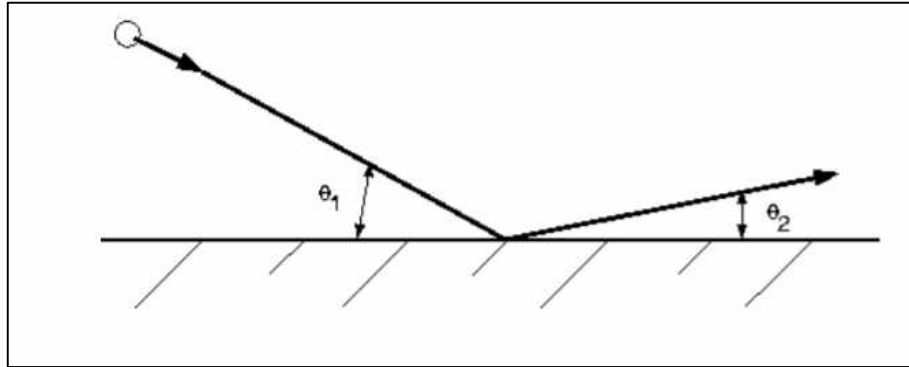


Figura 2.1 - Esquematização da reflexão das partículas.

$$\text{Componente normal: } e_n = \frac{V_{2,n}}{V_{1,n}} \quad (2.10)$$



$$\text{Componente tangencial } a_{e_t} = \frac{V_{2,t}}{V_{1,t}} \quad (2.11)$$

## 2.5. Forças utilizadas na fase discreta

Para a realização da simulação no *Fluent*® utilizou-se algumas forças disponíveis no software, como a *Força de Sustentação de Saffman*, a *Força de massa virtual* e o gradiente de pressão.

### 2.5.1. Força de sustentação de Saffman

A força de sustentação de Saffman gera uma sustentação na partícula de fluido, neste caso na partícula hidrogênio, devido a rotação gerada pela fase fluida ao passar pela fase discreta. A Fig. 2.2 ilustra o princípio da força.

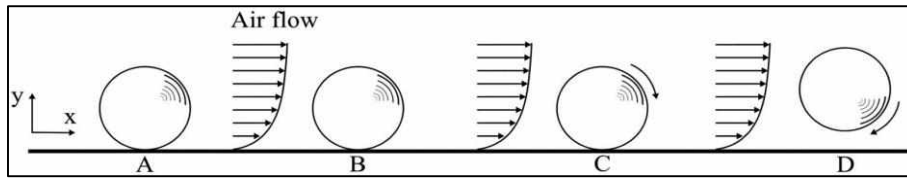


Figura 2.2 - Princípio de atuação da Força de Sustentação de Saffman.

A força de sustentação de Saffman é definida pela seguinte Eq. 2.12, de acordo com o *Fluent*®.

$$\vec{F} = \frac{2Kv^{\frac{1}{2}}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk}d_{kl})^{\frac{1}{4}}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (2.12)$$

onde  $K = 2,594$  e  $d_{ij}$  é o tensor de deformação.

### 2.5.2. Força de massa virtual

No caso do escoamento bifásico, forças adicionais são incorporadas. A primeira nesse caso é a força de massa virtual, que é a força requerida para acelerar o fluido em torno da partícula. Essa força pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{F}_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (2.13)$$

É importante ressaltar que quando a densidade do fluido é maior que a da partícula,  $\rho > \rho_p$ , uma força adicional surge devido ao gradiente de pressão:

$$F_x = \left( \frac{\rho}{\rho_p} \right) u_{pi} \frac{\partial u}{\partial x_i} \quad (2.14)$$

### 2.5.3. Força devido ao Gradiente de pressão

A força devido ao gradiente de pressão aplicado nas microbolhas é fácil de deduzir, é definido como a diferença de pressão do escoamento multiplicado pela área de microbolha, como mostra a Eq. 2.15.

$$F_{gp} = (P_{sai} - P_{entra}) * A_{bolha} \quad (2.15)$$

## 2.6. Cálculo da tensão de cisalhamento

A redução do arrasto com injeção de microbolhas ainda não é totalmente compreendido, porém sabe-se que algo acontece com a camada limite do escoamento, semelhante à injeção de polímeros. Experimentos práticos mostram que as microbolhas de hidrogênio, em um escoamento de água, são responsáveis pela diminuição da viscosidade, além de modificar a camada limite turbulenta do escoamento.

É interessante que a força de cisalhamento das paredes seja reduzida com a injeção de microbolhas, diminuindo assim o gradiente de pressão total do escoamento, como mostra a Eq. 2.18.

$$2\tau HL + 2\tau LB = (P_{sai} - P_{entra})BH \quad (2.16)$$

$$(B + H)2\tau L = \Delta P * BH \quad (2.17)$$

$$\tau = \frac{\Delta P * B * H}{2L * (B + H)} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.18)$$

## 2.7. Fração volumétrica de hidrogênio

Geralmente as microbolhas são produzidas através de uma eletrólise aquosa de um arame metálico, geralmente usa-se cobre. Logo, é necessário saber qual é a taxa de hidrogênio produzido e quanto será injetado no escoamento. Para definir isso, utiliza-se a razão adimensional mostrada na Eq. 2.19, que garante qual é a fração volumétrica de hidrogênio que está sendo injetado no escoamento.

$$\alpha_m = \left( \frac{Q_a}{Q_a + U_{m0}bh} \right) \times 100 \quad (2.19)$$

### 3. Metodologia e Desenvolvimento

Foram realizadas duas simulações diferentes com diferentes condições de contorno. A primeira que foi realizada seguiu o modelo experimental criado por Hassan e Ortiz-Villafuerte, o qual a condição de contorno principal era a injeção de microbolhas na entrada do escoamento.

Diferentemente da primeira, a condição de contorno associada à segunda simulação foi a injeção das microbolhas na camada limite do escoamento de água, como no experimento realizado por Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996).

#### 3.1. Microbolhas injetadas na entrada do domínio

Inicialmente foi realizada a simulação de um canal com água e microbolhas entrando juntos na região de entrada seguindo o modelo criado por Hassan e Ortiz-Villafuerte. O canal de água, com as dimensões 0,0881 m x 0,150 m x 3,05 m, foi desenhado e malhado no *ICEM*® para posteriormente ser simulada no *Fluent*®. A malha foi gerada com hexaedros apenas, e totalizou 65922 elementos. Os elementos próximos às arestas principais do canal foram mais refinados para que o perfil de camada limite fosse mais bem predito, isso pode ser observado na Fig. 3.1.

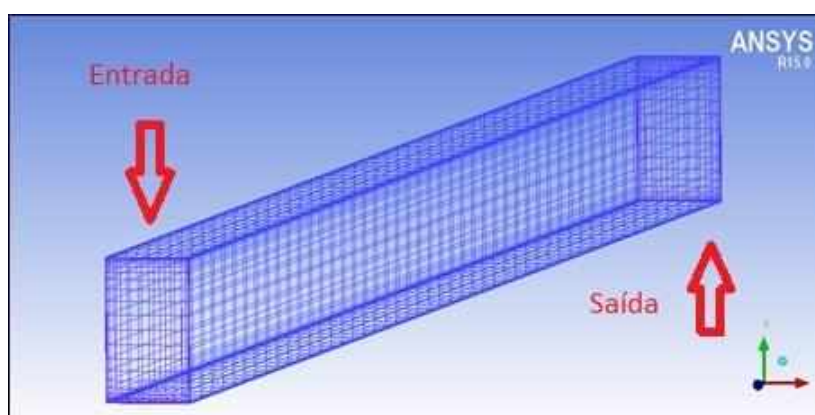


Figura 3.1 - Malha do canal de água e microbolhas com 65922 elementos.

O modelo utilizado foi a teoria dos escoamentos com fase discreta Lagrangiana disponível no *Fluent*®, a qual as partículas de fluido estão sujeitas a vários fenômenos, entre eles uma reflexão elástica ou inelástica quando encontram uma parede, que foi o caso deste estudo. Foi utilizado a opção de reflexão que faz com que a partícula reflita na parede com um certo coeficiente de restituição baseado na diferença de velocidade antes e depois do choque com a superfície.

A simulação com as microbolhas foi em regime transiente, pois em regime permanente não houve convergência. O resíduo da continuidade oscilou sobre valores altos, e mesmo alterando os valores de subrelaxação e os métodos de solução das equações.

O modelo de viscosidade turbulenta utilizado foi o *k-epsilon* padrão, com as funções de parede também padronizadas. O material fluido em escoamento utilizado foi a água no estado líquido. A fase discreta consistiu em partículas inertes de hidrogênio.

A condição de contorno atribuída à entrada do domínio foi de  $0,0772 \text{ m/s}$  de velocidade imposta absoluta na direção  $z$  do plano Cartesiano, a intensidade turbulenta permaneceu a padrão de 5%, e a taxa de viscosidade turbulenta de 10. As bolhas foram injetadas juntamente com a água, com a mesma velocidade de  $0,0772 \text{ m/s}$  e fluxo mássico de  $4 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ . O diâmetro da bolha foi fixado em  $30 \mu\text{m}$ , de acordo com o experimento. O outlet foi definido como pressão imposta enquanto as demais superfícies foram definidas como parede sem deslizamento.

Os métodos de solução das equações foram quase todos baseados no método conhecido como *Second Order Upwind*, exceto o gradiente e a pressão que foram definidos como *Green-Gaus Cell Based* e *Standard*, respectivamente. O controle da solução não foi alterado, logo os fatores de subrelaxação foram mantidos constantes, Pressão = 0,3, Densidade = 1, Forças de corpo = 1, Momento = 0,7, Energia cinética turbulenta = 0,8, Taxa de dissipação turbulenta = 0,8, Viscosidade Turbulenta = 1, Fontes da fase discreta = 0,5.

### **3.2. Microbolhas injetadas na região de camada limite**

Para a realização das simulações e processamento dos dados, utilizou-se como base a geometria e o método de injeção desenvolvido por Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996), que consiste em um experimento com um canal de água, e a injeção de microbolhas é realizada na região superior ou inferior do escoamento, afim de obter o maior número de microbolhas localizadas na camada limite do escoamento. A bancada experimental utilizada na pesquisa está representado na Fig 1.2. A medição da tensão de cisalhamento é feita com um transdutor de flutuações de elemento localizado no final do canal. Com base no aparato experimental do artigo, foi feito um canal similar e a malha do mesmo no *ICEM®*, passando para o *Fluent®* para analisar o pós processamento da simulação.

A malha feita no *ICEM*®, representada na Fig. 3.2, foi do tipo não estruturada com 102600 elementos hexagonais, 96441 nós. As dimensões do canal são: 1,3 x 0,01 x 0,1.

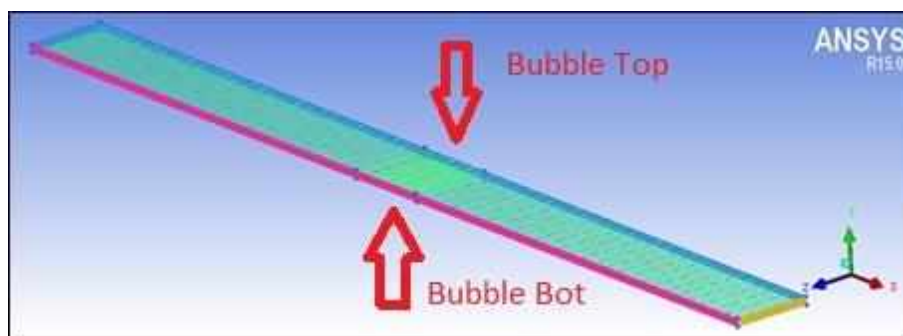


Figura 3.2 - Representação da malha referente ao canal simulado.

Primeiramente foi simulado o canal apenas com água em regime permanente, com o solucionador baseado em pressão, até a convergência. No momento em que a simulação convergiu, iniciou-se a simulação em regime transiente com a injeção de microbolhas. Foram feitas cerca de 20 a 40 iterações para cada passo de tempo em um total de 1000 passos de tempo, totalizando 20000 a 40000 iterações durante a fase transiente.

O modelo utilizada foi a teoria dos escoamentos com fase discreta Lagrangiana disponível no *Fluent*®, a qual as partículas pertencentes a fase discreta estão sujeitas a vários fenômenos, entre eles uma reflexão elástica ou inelástica quando encontram uma parede, que foi o caso deste estudo, foi utilizado a opção de reflexão, que faz com que a partícula reflita na parede com um certo coeficiente de restituição fixo, calculando a velocidade após o choque.

O modelo de viscosidade turbulenta utilizado foi o *k-epsilon* padrão, com as funções de parede também padronizadas. O material fluido em escoamento utilizado foi a água no estado líquido. A fase discreta consistiu em partículas inertes de hidrogênio.

A região de entrada, também conhecida como inlet, localizado no lado oposto da região amarela, região de saída (outlet), foi definido com uma velocidade de entrada igual a 10 m/s absoluta na direção “x”, a intensidade turbulenta permaneceu a padrão de 5%, e a taxa de viscosidade turbulenta de 10. As bolhas foram injetadas na superfície denominada *bubble top*, localizado no meio do canal, com velocidade de 6,3 m/s e fluxo mássico de  $5,5 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ . O diâmetro das microbolhas utilizado na simulação foi de 100  $\mu\text{m}$ . O outlet (região amarelada) foi definido como pressão de saída e o resto das superfícies (região esverdeada) foram definidas como parede, exceto os lados 1 e 2,

denominados como *side1* e *side2*, coloridos com a cor rosa na imagem acima, que foram definidos na condição de simetria.

Os métodos de solução das equações foram quase todos baseados no método conhecido como *Second Order Upwind*, exceto o gradiente e a pressão que foram definidos como *Green-Gaus Cell Based* e *Standard*, respectivamente. O controle da solução não foi alterado, logo os fatores de subrelaxação foram mantidos constantes, Pressão = 0,3, Densidade = 1, Forças de corpo = 1, Momento = 0,7, Energia cinética turbulenta = 0,8, Taxa de dissipação turbulenta = 0,8, Viscosidade Turbulenta = 1, Fontes da fase discreta = 0,5.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1. Microbolhas injetadas na entrada do domínio

Os resultados obtidos nesta metodologia não foram satisfatórios, pois o gradiente de pressão não reduziu com a injeção das microbolhas no fluxo de água, pelo contrário, houve um pequeno acréscimo no gradiente de pressão, como mostra a Fig. 4.1. Na condição de escoamento sem microbolhas, o campo de pressão variou de 0 a 3,84 Pa; com microbolhas, variou de 0 a 3,88 Pa. O motivo que levou a não redução do arrasto, foi o fato das microbolhas não ficarem concentradas próximas da camada limite do escoamento entre o fluido e as paredes do canal.

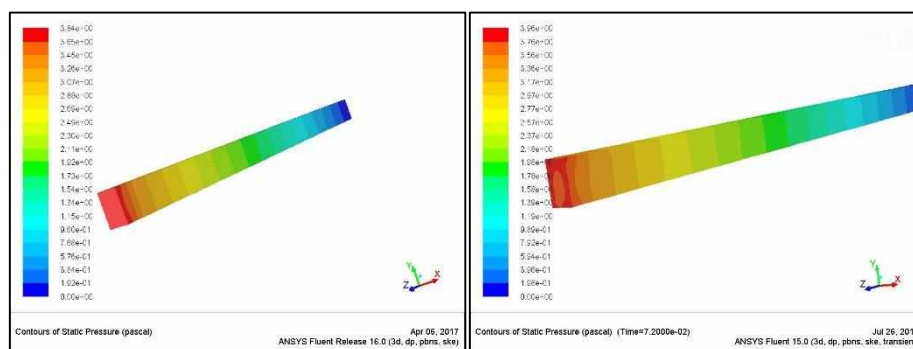


Figura 4.1 - Gradiente de pressão sem e com microbolhas.

Porém, se observar o *inlet* da simulação acima, pode-se notar que na região central, local de maior concentração de microbolhas, teve uma ligeira redução da pressão, como mostra a Fig. 4.2.

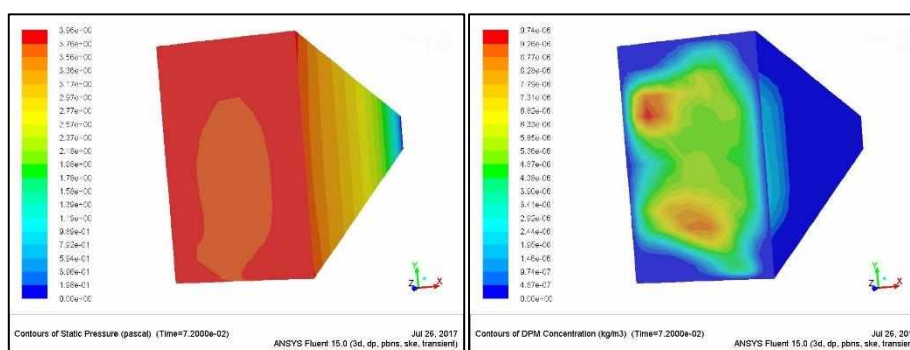


Figura 4.2 - Campo de pressão no inlet à esquerda e concentração de hidrogênio no inlet à direita.

A tensão de cisalhamento no canal sem microbolhas foi  $0,0349 \text{ N/m}^2$  e com a mistura bifásica foi  $0,0360 \text{ N/m}^2$ . Ambas obtidas analiticamente através da Eq. 2.18.



Neste caso, Hassan e Ortiz-Villafuerte conseguiram a redução de arrasto de 21,2% para as condições simuladas, algo que não foi possível visualizar no CFD.

#### 4.2. Microbolhas injetadas na região de camada limite

Outro método interessante seria injetar as microbolhas diretamente na região da camada limite, para que ocorresse o fenômeno observado pelos japoneses que é a redução da tensão de cisalhamento devido a injeção de microbolhas na região de camada limite turbulenta.

Seguindo essa metodologia desenvolvida por Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996), utilizando microbolhas com diâmetro igual a  $100\ \mu m$ , foi possível observar uma redução no gradiente de pressão de 12%, como ilustram as Fig. 4.3 e 4.4. O gradiente de pressão sem microbolhas variou de 0 a  $1,06 \times 10^5 Pa$  e com microbolhas variou de 0 a  $9,24 \times 10^4$ .

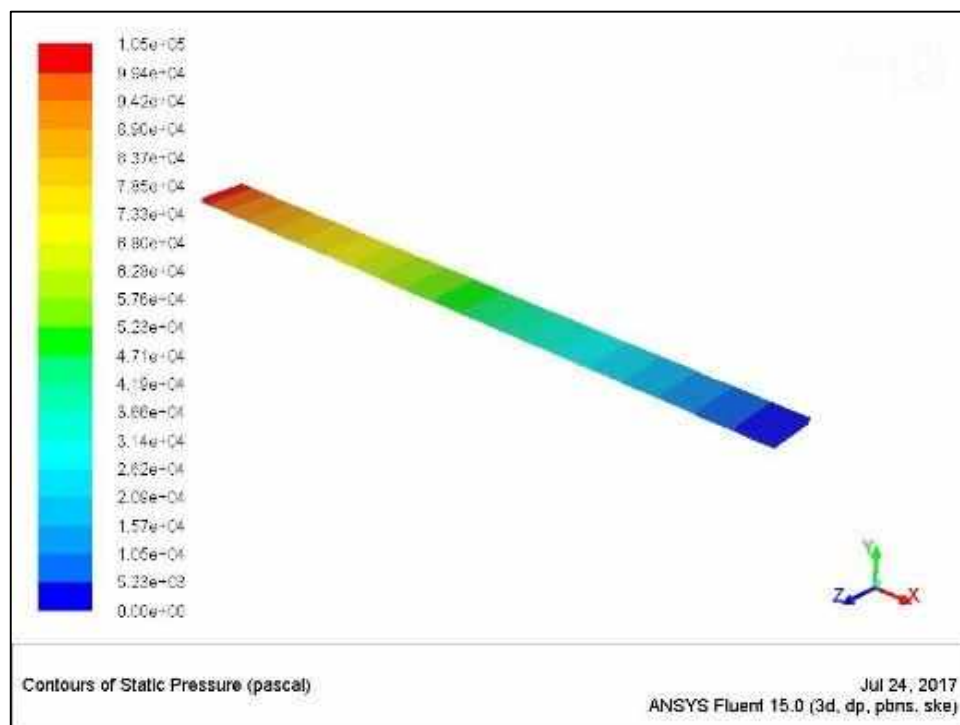


Figura 4.3 - Campo de pressão do escoamento sem microbolhas.

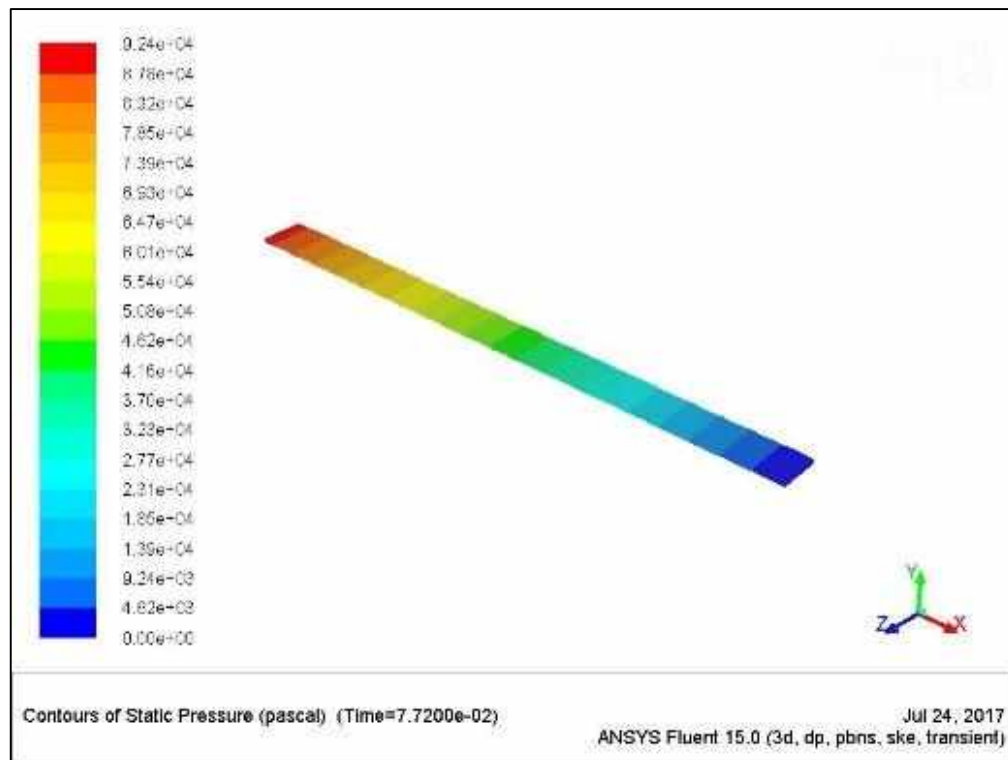


Figura 4.4 - Campo de pressão do escoamento com microbolhas de diâmetro igual a 100  $\mu\text{m}$ .

Essa redução da pressão observada no escoamento, implica na redução da tensão de cisalhamento das paredes com o fluido em escoamento, que pode ser calculada a partir da Eq. 2.18. Logo a tensão de cisalhamento, reduziu de aproximadamente  $411,67 \text{ N/m}^2$  para  $323,08 \text{ N/m}^2$  com a injeção das partículas.

Nas mesmas condições, Kato; Guin; Yamaguchi; Maeda; Miyanaga (1996). conseguiram uma redução de arrasto de 18%, valor próximo da simulação numérica. Este valor está representado na Fig. 4.5. A concentração utilizada em questão foi de  $40 \text{ l/min}$  e o  $\alpha_m$  foi de 7,611.

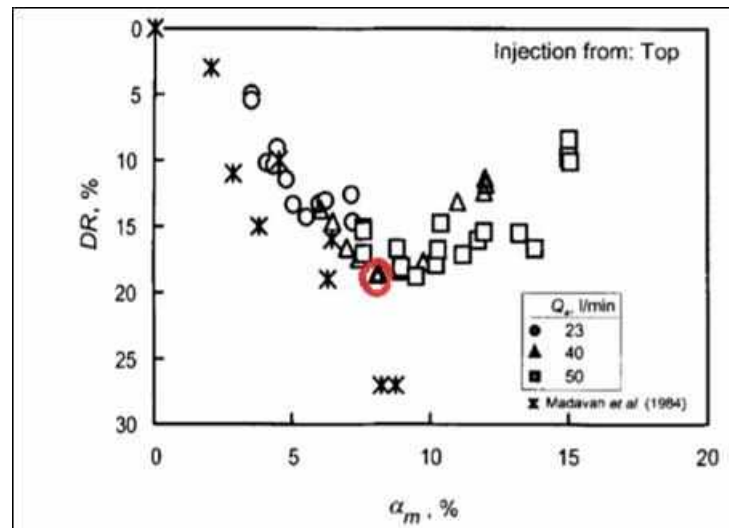


Figura 4.5 - Gráfico da redução do arrasto em função da concentração de ar injetado no escoamento (KATO; GUIN; YAMAGUCHI; MAEDA; MIYANAGA, 1996).

Para ter certeza que as bolhas de hidrogênio estavam sendo injetadas no escoamento, foi verificado a concentração das mesmas, em  $kg/m^3$ , ao longo do escoamento. Isso pode ser observado na Fig. 4.6.

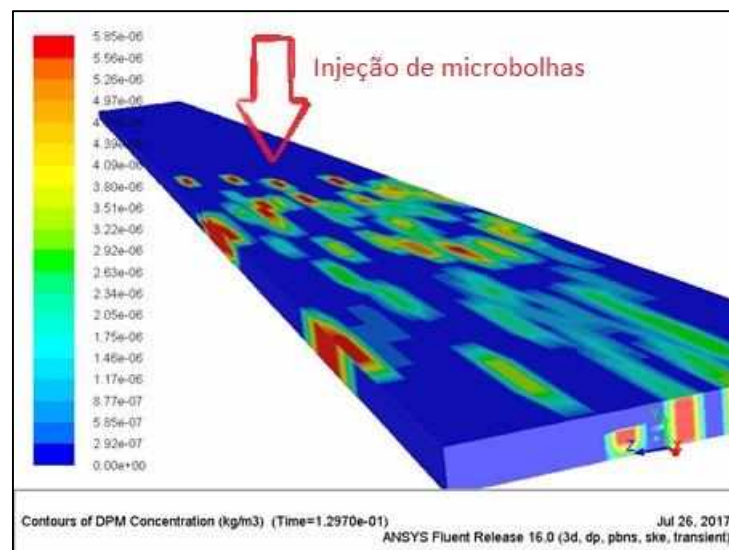


Figura 4.6 - Concentração de microbolhas (fase discreta) na região de saída do canal.

A tensão de cisalhamento pontual próximo à parede superior do duto mostra que a presença de microbolhas está influenciando na camada limite entre a parede e o escoamento. A Fig. 4.7 mostra o contorno da tensão de cisalhamento no final do canal, próximo da região de saída. Os valores pontuais apresentados são  $368 Pa$  e  $408 Pa$  respectivamente.

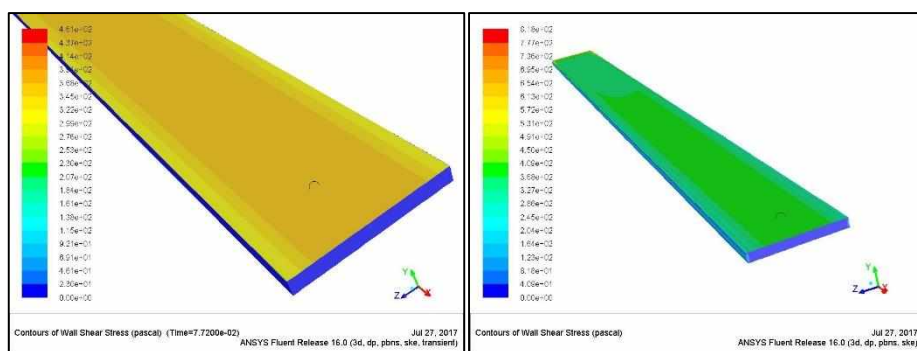


Figura 4.7 - Tensão de cisalhamento na parede superior do canal. Com microbolhas à direita e sem microbolhas à esquerda.

Analisando o perfil de velocidade em um plano paralelo a entrada do fluido, após a injeção de microbolhas, como ilustra a Fig. 4.8, pode-se verificar o princípio de não deslizamento nas paredes, no entanto o perfil de velocidade do escoamento não variou expressivamente através dessa visualização, ambos os perfis ficaram muito próximos, como mostra a Fig. 4.9.

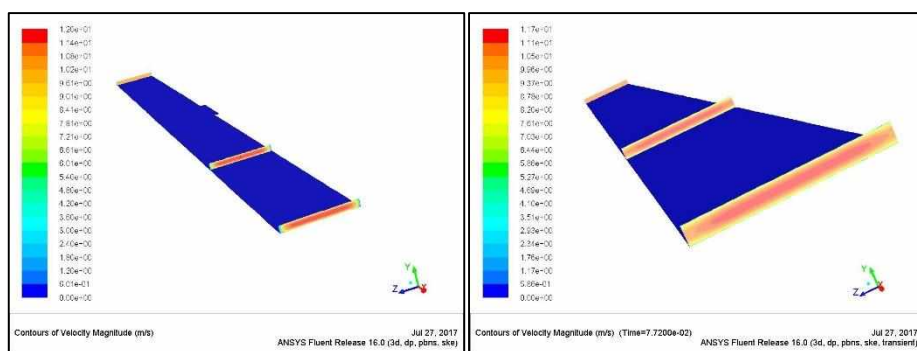


Figura 4.8 - Perfil de velocidade do escoamento sem microbolhas à esquerda e com microbolhas à direita.

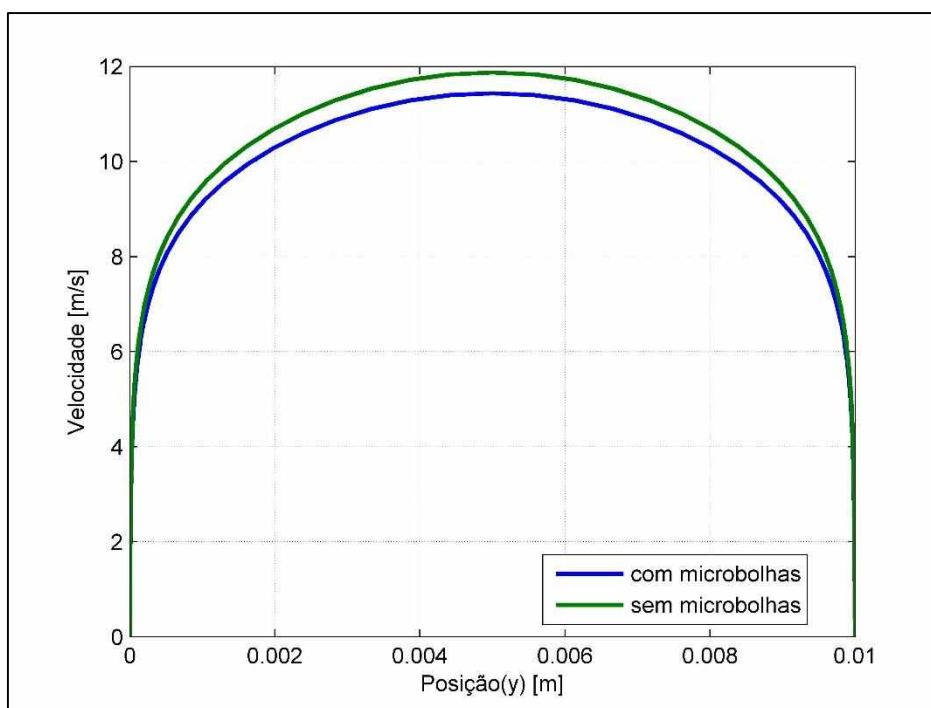


Figura 4.9 - Perfil de velocidade na parede do canal com e sem microbolhas de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro.

Para a melhor visualização da redução da velocidade próxima às paredes, foi obtido os valores pontuais do escoamento. A Tab. 4.1 mostra a redução da velocidade próximo às paredes do escoamento.

Tabela 4.1 - Redução da velocidade com a injeção de microbolhas.

<i>Altura (h) [m]/ Velocidade [m/s]</i>	<i>Sem microbolhas</i>	<i>Com microbolhas</i>
$1 \times 10^{-6}$	2.49381	2,3557
$2,1 \times 10^{-5}$	3.57908	3,39885
$9,97 \times 10^{-3}$	3.57908	3,39885
$9,99 \times 10^{-3}$	2.49381	2,35557

## 5. Conclusão

Os resultados das simulações foram motivadores, porém não foi possível comprovar que a mistura de água com uma pequena quantidade de massa de hidrogênio reduz a viscosidade geral do escoamento, que é uma das teorias impostas nas pesquisas com microbolhas.

No entanto, houve uma redução do gradiente de pressão no caso em que as microbolhas foram injetadas diretamente na camada limite turbulenta do escoamento, comprovando essa teoria numericamente.

A maior dificuldade nesse tipo de simulação é conseguir fazer com que as microbolhas fiquem concentradas na região de interesse, que nesse caso é a camada limite turbulenta. Esse estudo não propõe uma maneira ótima, porém o canal com água simulado na seção 4.2 foi quase próximo de um caso 2D, garantindo que muitas microbolhas estejam concentradas na área de interesse.

Trabalhos futuros podem investigar melhor o que está ocorrendo na camada limite do escoamento e averiguar se os turbilhões causados pela turbulência estão sendo amortizados com a presença das microbolhas de hidrogênio, teoria comprovado que ocorre no caso da injeção de polímeros no escoamento.

A principal aplicação prática dessa tecnologia está localizada na área marítima com a utilização de microbolhas nos cascos de navios, que vão implicar em uma redução no arrasto de forma dos mesmos, ocasionando a redução de combustível e possibilitando o aumento a velocidade de cruzeiro sobre a água.

## Bibliografia

HASSAN, Y.A.; ORTIZ-VILAFUERTE, J. **Experimental Study of Micro-bubble Drag Reduction Using Particle Image Velocimetry**, Departmente of Nuclear Engineering Texas A&M University;

KAKUGAWA, A.; KAWASHIMA, H.; TAKAHASHI, T.; KODAMA, Y. (1999). **Velocity measurements of flows with microbubbles using PIV**. ATEM'99 JSME. Ube City, Japan;

CECCIO, S.L. **Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection**. University of Michigan.

KATO, H.; FUJISHITA, S.; KATAYOSE, H. **Frictional drag reduction by micro air bubbles generated in a flow acceleration water channel**. SHF 2013 Conference.

JEAN-LOUIS MARI'E. **A simple analytical formulation for microbubble drag reduction**. PhysicoChemical Hydrodynamics, 1987, 8 (2), pp.213-220.

KATO, H.; GUIN, M. M.; YAMAGUCHI, H.; MAEDA, M.; MIYANAGA, M. **Reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel**, J. Mar Sci Technol (1996).

MADAVAN, N.K.; DEUTSCH, S.; MERKLE, C.L. (1985). **Numerical investigation into the mechanisms of microbubble drag reduction**. J Fluids Eng 107:370-377

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. (2000). **Boundary Layer Theory**. 8th edition, Springer, New York.

TAKAHASHI, T.; KAKUGAWA, A.; KAWASHIMA, H.; KODAMA, Y. (1999). **Experimental skin friction reduction by microbubbles using a ship with a flat bottom**. 31st Symposium on Turbulence Flow. <http://www.srimot.go.jp/spd/drag/drag2e.htm>.

MCCORMICK, M.E.; BHATTACHARYYA, R. (1973). **Drag reduction of a submersible hull by electrolysis**. Nav Eng J 85:11-16

KODAMA, Y. (1998). **Effect of microbubble distribution on skin friction reduction**. International Symposium on Seawater Drag Reduction. <http://www.srimot.go.jp/spd/drag/drag2e.htm>.

KODAMA, Y.; KAKUGAWA, A.; TAKAHASHI, T.; KAWASHIMA, H. (2000) **Experimental study on microbubbles and their applicability to ship for skin friction reduction.** Int J Heat Fluid Flow 21, 582-588.

PAL, S.; MERKLE, C.L.; DEUTSCH, S. (1988). **Bubble characteristics and trajectories in a microbubble boundary layer.** Phys Fluids 31:744- 751



## Apêndice

```
%% Vitor Taha Sant'Ana 11221EAR021
% Engenharia Aeronáutica
%% Calculo da tensão de cisalhamento
% Microbolhas juntas no inlet
L1=3.05; %Comprimento do canal[m]
H1=0.150; %Altura do canal[m]
B1=0.0881; %Largura do canal[m]

%talw*L*B (TOP and BOTTOM)
%taw*H*L (RIGHT and LEFT)
% Sem microbolhas
deltap = 3.84;
talw = (deltap*B1*H1)/((B1+H1)*2*L1) %2*talw*H*L + 2*talw*L*B = (Pout-
Pin)*BH (balanço de forças) [N/m^2]

% Com microbolhas
deltap2 = 3.88;
talw2 = (deltap2*B1*H1)/((B1+H1)*2*L1) % [N/m^2]

% Microbolhas na camada limite
L2=1.3; %Comprimento do canal[m]
H2=0.01; %Altura do canal[m]
B2=0.1; %Largura do canal[m]

%talw*L*B (TOP and BOTTOM)
%taw*H*L (RIGHT and LEFT)
% Sem microbolhas
deltap3 = 1.05e5;
talw3 = (deltap3*B2*H2)/((B1+H2)*2*L2) %2*talw*H*L + 2*talw*L*B =
(Pout-Pin)*BH (balanço de forças) [N/m^2]

% Com microbolhas
deltap4 = 9.24e4;
talw4 = (deltap4*B2*H2)/((B2+H2)*2*L2) % [N/m^2]
```